Metodologia para avaliação de sistemas de infiltração de águas pluviais urbanas – fase de concepção

Priscilla Macedo Moura
Sylvie Barraud
Márcio Benedito Baptista

RESUMO: Os sistemas de infiltração são frequentemente utilizados como uma opção na gestão das águas pluviais urbanas. Esses sistemas reduzem as vazões e os volumes que chegam aos corpos receptores, reduzem a ocorrência de inundações e possibilitam a recarga da água subterrânea. Estas técnicas podem assumir diferentes configurações e formas, podendo ainda desempenhar múltiplos usos. Apesar dessas vantagens, a sustentabilidade desses sistemas a longo termo não é forçosamente assegurada e seu real desempenho deve ser obtido considerando vários aspectos, por vezes conflitantes. Um sistema de auxílio à decisão foi proposto, baseado no método multicritério ELECTRE III, com a finalidade de auxiliar na comparação de alternativas de projeto, em fase de concepção dos sistemas. Indicadores de desempenho foram propostos, integrando os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Os critérios definidos para consideração foram risco de inundação, contribuição à recarga de aqüíferos, poluição do solo, produção de resíduos sólidos, segurança dos usuários, baixo custo, boa aceitação social, multifuncionalidade e, finalmente, baixo uso de recursos naturais não renováveis. Um estudo de caso foi realizado a fim de validar a metodologia, que demonstrou baixa sensibilidade e grande robustez à variação de parâmetros do método.

PALAVRAS-CHAVE: análise multicritério, drenagem urbana, indicadores, sistemas de infiltração.

ABSTRACT: Infiltration systems are frequently used as an option to manage urban stormwater. By reducing flows and volumes in downstream sewers or in surface waters, they decrease the overflows and make it possible to recharge groundwater. Finally, they come in various forms and can play different uses. Despite these advantages their long term sustainability is not certain and their real performances have to be assessed taking into account various and sometimes conflicting aspects. To address this problem a decision support system was proposed, based on a multicriteria method (ELECTRE III) it aims to help at evaluating and comparing the performance of alternatives or different projects at the design stage. A list of performance indicators was proposed integrating technical, economical, environmental and social aspects. The performances defined were: Low flooding; low water resources pollution; positive contribution to groundwater recharge; low soil pollution; low waste production; aptitude to be safe for users and staff; low costs; good aptitude to be maintained; good social acceptance; ability to provide other functions; and finally, little use of raw materials. A case study was carried out to validate the methodology which demonstrates low sensitivity and high robustness to the variations in the method parameters.

KEY WORDS: multicriteria analysis, urban drainage, indicators, infiltration systems.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de infiltração de águas pluviais urbanas são frequentemente utilizados como uma opção para a gestão para a drenagem urbana. Essas técnicas apresentam importantes vantagens:

- reduzem as vazões de pico e os volumes nos condutos de jusante ou nos corpos receptores;
- limitam o fenômeno de lavagem das superfícies urbanas com conseqüente redução nas cargas poluidoras, uma vez que drenam áreas mais próximas à fonte;
- favorecem a recarga de aquíferos através da infiltração;
- apresentam potencial de redução da carga poluente das águas pluviais por meio de decantação;
- possibilitam a urbanização de áreas distantes de corpos receptores, uma vez que as áreas podem ser drenadas exclusivamente por infiltração;

- podem assumir múltiplas formas e diferentes usos, como quadras esportivas permeáveis ou pavimentos permeáveis.

Apesar dessas vantagens, a sustentabilidade, em termos ambientais e sócio-econômicos, desses sistemas a longo termo não é forçosamente garantida (Dechesne et al., 2004). Diversas questões surgem a partir da utilização dessas técnicas, relacionadas à eficiência desses sistemas na proteção contra inundações (considerando a evolução desses sistemas ao longo do tempo com o fenômeno da colmatação, por exemplo), a eficiência desses sistemas na proteção do meio ambiente e da saúde, o risco de poluição das águas subterrâneas, a gestão dos sedimentos retidos, aceitação social, custos (esse tipo de sistema é realmente mais econômico quando comparado aos sistemas tradicionais, como atualmente se acredita?).

Devido às razões aqui expostas, a avaliação de técnicas de infiltração é indispensável e a busca de um compromisso considerando suas múltiplas facetas é necessária.

Para lidar com esse problema um sistema de auxílio à decisão foi proposto, destinado a projetistas e gestores, tendo por objetivo auxiliar na avaliação e comparação de desempenho de alternativas ou de diferentes projetos na fase de concepção dos sistemas.

Para tanto foi proposto um conjunto de indicadores, integrando aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Esses indicadores são em seguida agregados, por um método multicritério, como será descrito nos próximos itens do presente trabalho.

INDICADORES PROPOSTOS

Como expresso anteriormente, a fim de avaliar ou comparar estratégias de infiltração de um projeto, um jogo de indicadores de desempenho foi desenvolvido. O trabalho foi realizado com a participação de um grupo de trabalho multidisciplinar e o auxílio do grupo de pesquisa OTHU[1], reunido para o desenvolvimento de um observatório *in situ* em hidrologia urbana localizado em Lyon, França. O grupo de trabalho, com composição bastante dinâmica durante a pesquisa, foi composto por pesquisadores de diferentes áreas (hidrologia, biologia, química, ambiental, hidrogeologia, ciências sociais e econômicas) e profissionais de empresas públicas e privadas (projetistas, e responsáveis pela gestão de sistemas existentes). O observatório *in situ* foi utilizado na aquisição de informações e práticas provenientes de intensivo monitoramento, tendo sido de extrema utilidade na construção dos indicadores e nos testes dos métodos utilizados para a obtenção dos indicadores de desempenho. Os critérios, e os indicadores propostos relativos a cada critério, são apresentados a seguir.

Critério 1: Proteção contra inundações

A avaliação do critério proteção contra inundação leva em consideração dois aspectos preponderantes: o nível de proteção considerado quando do dimensionamento do sistema e a vulnerabilidade da área sujeita a inundação durante um evento pluvial intenso.

Indicador de frequência de dimensionamento

$IC_{H1D1} = T_{dim}$ (Preferência crescente,
faixa de variação: $[0, +\infty[$, anos) (1)

T_{dim}: Tempo de retorno utilizado no dimensionamento (anos)

Indicador de vulnerabilidade das superfícies atingidas

O presente critério é definido de acordo com sete subindicadores, dependendo do tipo de uso do solo da área sujeita a inundação. O objetivo desse indicador é de verificar a vulnerabilidade das superfícies atingidas caso ocorra um evento de precipitação excepcional.

$IC_{H1D2Tipoi} = V_{inuTipoi}$ (Preferência decrescente,
faixa de variação: $[0, +\infty[$, m^3) (2)

$V_{inuTipoi}$: volume total de inundação na área de tipo *i*, segundo o tipo de ocupação do solo (m^3), considerando um evento pluvial intenso (e.g. 50 anos de tempo de retorno)

Com a finalidade de se considerar a importância relativa de cada tipo de uso do solo, coeficientes de ponderação foram atribuídos para cada tipologia, devendo os mesmos ser utilizados no método multicritério a ser apresentado ulteriormente. A título de exemplo, considerou-se que uma inundação em uma área de parque é menos grave que uma inundação em uma área industrial de alto risco de poluição.

[1] http://www.graie.org/othu/

Para o estabelecimento dos pesos a serem considerados, o Método de Análise Hierárquica – AHP – (Saaty, 1977) foi utilizado. Ele foi aplicado por diferentes integrantes do grupo de trabalho, sendo que uma média dos valores encontrados deve ser utilizada. A Tabela 1 mostra as diferentes tipologias de uso do solo consideradas, bem como seus pesos e coeficientes de variação correspondentes. De forma geral os integrantes do grupo foram bastante coerentes em suas análises, entretanto diferenças de opinião entre eles foram constatadas.

Critério 2: Reter a poluição no sistema (Não degradar a qualidade dos aqüíferos / Não poluir o solo em profundidade)

Do ponto de vista ambiental, o sistema de infiltração ideal é aquele que funciona como um filtro para a poluição, não deixando a poluição passar para camadas profundas do solo e atingir o lençol subterrâneo. A possibilidade de poluição nos aqüíferos é um aspecto de grande importância, porém, após diversas tentativas, nenhuma formulação de indicador foi satisfatória para avaliá-lo individualmente, tendo-se optado pela formulação em conjunto com o aspecto retenção da poluição no solo. Quatro são os indicadores utilizados para avaliar esses aspectos, ligados à proteção do lençol subterrâneo, propriamente dita, à aptidão do solo a reter poluentes e às condições de pressão antrópica presentes na bacia.

Indicador de proteção do lençol

Uma vez que o solo funciona como filtro para as partículas em suspensão (nas quais a maior parte dos poluentes está aderida - Chebbo, 1992), quanto mais espessa for a zona não saturada melhor é a retenção de poluentes.

IC_{PL1} = ZNS(Preferência crescente,
faixa de variação: $]0, +\infty[$, m) (3)

ZNS: espessura da zona não saturada sob o sistema de infiltração (m). Quando a zona possuir diversos sistemas de infiltração com espessuras de zonas não saturadas diferentes, deve ser utilizado o valor mais desfavorável, ou seja, a menor espessura de zona não saturada.

Indicador de aptidão do solo a reter poluentes

O pH é a principal característica do solo mais influencia na retenção de poluentes, conforme pode ser visto mais detalhadamente em Moura et al. (2009).

IC_{PL2} = pH se pH $\geq$ 5 (4)

senão IC_{PL2} = 0 (Preferência crescente,
faixa de variação: 0 ou $[5\ ,\ 14\ ]$)

pH: mais baixo valor de pH encontrado no solo sob os sistemas de infiltração

IC_{PL3} = Vi se $10^{-6} \leq Vi \leq 10^{-4}$m/s (5)

senão IC_{PL3} = 1 (Preferência decrescente,
faixa de variação $[10^{-6}\ ,\ 10^{-4}]$ ou 1, adimensional)

Vi: maior condutividade hidráulica saturada encontrada no solo sob o sistema de infiltração (m/s)

TABELA 1
Tipologias de uso do solo consideradas

Tipo i	Uso do solo	Coeficiente de ponderação	Coeficiente de variação (%)
PAR	Parques e jardins	0,033	21,6
EST	Estacionamento	0,033	19,1
VIA	Vias de tráfego	0,056	48,9
IBR	Indústria de baixo risco	0,095	38,3
RES	Área residencial	0,196	25,6
IAR	Indústria de alto risco	0,264	6,8
EQU	Equipamentos públicos	0,323	13,7

Indicador de pressão antrópica

O indicador proposto leva em consideração a pressão urbana, em termos de poluição. Esse indicador integra a área de drenagem contribuinte ao sistema, o tipo de ocupação do solo e a existência ou não de um sistema de pré-tratamento.

$$IC_{PR} = Max_i\left(\frac{Sa_i}{Sinf_i} \times F_i \times F_j\right) \quad (6)$$

(Preferência decrescente,

faixa de variação: $[0, +\infty[$, adimensional)

Para cada área *i* drenada por um sistema de infiltração, Sa_i: superfície drenada (m^2), $Sinf_i$: superfície de infiltração (m^2), F_i: fator segundo o tipo de uso do solo (Tabela 2), F_j: fator que considera a existência ou não de sistema de pré-tratamento (Tabela 3).

O fator de uso do solo foi definido utilizando a mesma metodologia (AHP) para definição dos coeficientes de vulnerabilidade no indicador de vulnerabilidade das superfícies atingidas pela inundação, explicitada anteriormente. Os tipos de uso do solo foram definidos segundo o potencial de poluição que a lavagem de cada tipo superfície pode gerar.

O fator F_j recebe o valor 1 se um sistema de pré-tratamento existe. Caso não exista sistema de pré-tratamento um coeficiente com a finalidade de penalização deve ser aplicado. Esses coeficientes foram obtidos por meio de consenso entre alguns integrantes do grupo de trabalho (ver os valores para F_j na Tabela 3).

Critério 3: Contribuição à recarga de aqüíferos

Apenas um indicador, concernente a este critério, foi aqui proposto. Caso haja risco de contaminação das águas subterrâneas, a recarga dos aquífero deve ser desencorajada e o indicador deve receber valor 0. Além disso, caso pelo menos uma das condições relativas ao critério "Reter a poluição no sistema" não for satisfeita, isto é IC_{PL1}<2m ou IC_{PL2} =0 ou IC_{PL3} = 1 então o indicador também deve receber o valor 0. Caso essas situações não sejam observadas, o indicador deve ser calculado segundo a formulação a seguir:

TABELA 2
Fator (Fi) segundo o tipo de uso do solo quanto à lavagem

Uso do solo	Fator de ponderação	Coeficiente de variação (%)
Ciclovia, passeios, etc.	0,05	1,3
Áreas residenciais	0,11	6,7
Áreas industriais	0,50	13,1
Vias de tráfego	0,34	14,4

TABELA 3
Fatores relativos à existência ou não de sistema de pré-tratamento (Fj)

Indicadores de retenção da poluição no sistema	Uso do solo quanto ao potencial de pré-tratamento			
	Ciclovia, passeios, etc.	Áreas residenciais	Áreas industriais	Vias de tráfego
Se nenhuma ou somente uma das seguintes condições for observada: $IC_{PL1}< 2m$; $IC_{PL2}= 0$; $IC_{PL3}= 1$	1	1	1,5	1,5
Se não	1	1,5	1,5	1,5

$$IC_{REC} = \frac{S_{di}}{S_{dt}}$$ (Preferência crescente, faixa de variação: [0 , 1], adimensional) (7)

S_{di}: superfície drenada por infiltração (m^2)
S_{dt}: superfície total da área em estudo (m^2)

Critério 4: Utilização de recursos naturais

Esse critério, ligado ao conceito de sustentabilidade, representa a quantidade de energia consumida para a construção e gestão do sistema. O consumo de energia inclui o consumo das máquinas, veículos e materiais utilizados na construção. Os coeficientes utilizados para cada tipo de consumo foram obtidos com o intuito de converter todas as unidades em equivalente habitante. Esse método propicia uma melhor compreensão do que em termos de energia primária equivalente. As relações entre energia/material e toneladas equivalentes de petróleo foram obtidas a partir de dados da literatura (Jansen *et al.*, 1990; Ballant, 2007). A conversão da energia consumida em equivalente habitante é dada pela divisão da energia total e material consumido pela energia consumida por 100.000 habitantes no Brasil (MME, 2005). O cálculo do indicador passa pelos quatro passos seguintes, relativos a quatro subindicadores. Todos os subindicadores e o indicador final têm como unidades a energia consumida por 100.000 habitantes – Energia Eq. x 10^5.

Energia consumida relativa à escavação

$IC_{RNexc} = 1{,}07\ V_{exc}$ (Preferência decrescente, faixa de variação: $[0, +\infty[$, Energia Eq. x 10^5) (8)

V_{exc} : volume de solo escavado durante a construção (m^3)

Energia consumida relativa à matéria prima utilizada

$IC_{RNmat} = 104{,}23\ Q_{géo} + 963{,}64\ V_{bet} + q_i\ V_{cond}$
(Preferência decrescente, faixa de variação:
$[0, +\infty[$, Energia Eq. x 10^5) (9)

$Q_{géo}$: quantidade de geotêxtil utilizada (m^2),

V_{bet} : volume de concreto (m^3), V_{cond} : volume da matéria prima das tubulações utilizadas (m^3), q_i: coeficiente, em energia equivalente, segundo o tipo de material das tubulações (Tabela 4).

TABELA 4
Valores de qi segundo o tipo de material das tubulações

Material das tubulações	Coeficiente q_i
Cerâmica	31 255
PVC	586 026
Concreto	39 068

Energia consumida relativa ao transporte

$IC_{RNtransp} = 1{,}47\ V_{exc}\ D_{exc} + 1{,}13\ V_{mr}\ D_{mr}$
(Preferência decrescente, faixa de variação:
$[0, +\infty[$, Energia Eq. x 10^5) (10)

V_{exci}: volume escavado (m^3), D_{exci}: distância para a evacuação do material escavado (km), V_{mr}: volume do material para preenchimento do sistema, caso necessário (m^3), D_{mr}: distância de entrega do material de preenchimento (km)

Energia consumida relativa à operação do sistema

$IC_{RNman} = 9{,}76 T_{bom}\ P_{bom} + 89{,}09\ D_{sed}$
(Preferência decrescente, faixa de variação:
$[0, +\infty[$, Energia Eq. x 10^5) (11)

T_{bom}: tempo estimado de funcionamento das bombas por ano (h), P_{bom}: potência do motor das bombas (kW), D_{sed}: distância para evacuação dos sedimentos retidos no sistema (km)

O indicador global é obtido como:

$IC_{RN} = IC_{RNexc} + IC_{RNmat} + IC_{RNtransp} + IC_{RNmain}$
(Preferência decrescente, faixa de variação:
$[0, +\infty[$, Energia Eq. x 10^5) (12)

Critério 5: Facilidade de manutenção e gestão

Esse critério (IC_{MAN}) é avaliado segundo uma nota atribuída a cada tipo de sistema de infiltração, de acordo com sua facilidade de manutenção. Essas notas podem ser específicas de cada gestor.

Para obter as notas, o gestor dos sistemas deve ordenar os diferentes tipos de sistemas do mais fácil a ser mantido ao sistema de mais difícil manutenção. A nota 1 deve ser dada ao sistema de manutenção mais fácil e os demais sistemas recebem notas superiores, de acordo com sua facilidade de manutenção sendo a nota máxima equivalente ao número total de sistemas em análise. Dois tipos de sistemas que

exijam o mesmo esforço de manutenção devem obter notas iguais (Preferência decrescente faixa de variação de $[1, +\infty[$).

Critério 6: Garantia da segurança dos usuários e trabalhadores

A fim de avaliar esse critério (IC_S), notas foram definidas por comparação, dois a dois, os diferentes tipos de sistemas de infiltração, apresentando diferentes níveis de segurança. As várias situações possíveis são apresentadas na Figura 1. As situações apresentadas levaram em consideração:

- Os principais tipos de técnicas: as valas ou valetas, trincheiras, poços e as bacias;
- Os tipos de acesso aos sistemas (sistema aberto ou não, facilmente ou dificilmente acessível...);
- Os meios de garantia de segurança previstos, principalmente para as bacias: presença de sinalização sobre a presença de água quando de eventos pluviais. A ausância desse tipo de sinalização pode ser menos problemática, segundo a localização da bacia, caso a bacia se encontre em local facilmente acessível às pessoas o risco será maior;
- Segurança operacional do sistema: facilidade de evacuação do sistema – margens com declividade suave, presença de escadas, rampas permitindo uma saída rápida do sistema – presença de dispositivos de segurança em torno das bacias com margens de declividade forte;
- Dispositivos de proteção das entradas e saídas de água (grades que impeçam a entrada de pessoas nas tubulações de entrada e saída de água, entrada de água distribuída, reduzindo a velocidade de entrada de água).

As notas foram então atribuídas através do mesmo sistema adotado para a definição da facilidade de manutenção e gestão. As notas finais a serem aplicadas são apresentadas na Tabela 5.

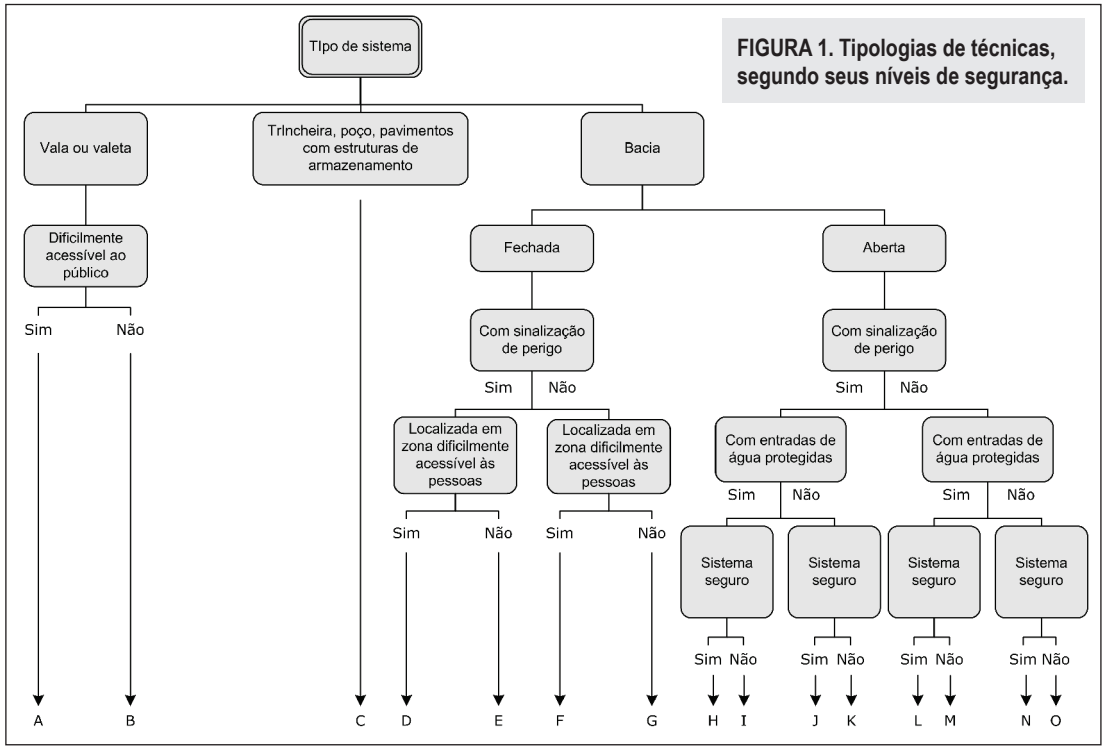


FIGURA 1. Tipologias de técnicas, segundo seus níveis de segurança.

Tabela 5
Notas segundo a segurança para cada tipo de sistema – coeficiente de variação médio

Tipo de sistema	Ic_s	Cv (%)
A	2,8	46,9
B	5,4	46,1
C	1,0	0,0
D	3,7	37,3
E	6,7	43,6
F	4,8	40,2
G	8,1	39,6
H	6,3	29,8
I	10,8	12,6
J	10,7	18,2
K	13,7	4,4
L	8,3	23,9
M	11,8	10,6
N	11,0	18,4
O	14,9	1,4

Critério 7: Produção de resíduos sólidos

Esse critério é avaliado por meio da correlação entre o volume de resíduos gerados e a área de contribuição (Saget, 1994), e a qualidade do sedimento gerado a partir da extensão de escoamento superficial, também assimilada como proporcional a área de drenagem.

$$IC_{RS} = \frac{\sum Sa_i}{n}$$ (Preferência decrescente, faixa de variação: $]0, +\infty[$) (13)

Sa_i: área de contribuição para o sistema i (m^2);
n: número total de sistemas na área em estudo.

A média das superfícies de contribuição serve como indicativo de superfícies de contribuição menores, apesar de que sistemas com áreas de contribuição pequenas possam compensar a existência de sistemas com grandes áreas de contribuição, para uma mesma alternativa de projeto, acredita-se que os resultados na comparação de alternativas de projeto tendam a favorecer as alternativas que melhor atendam a esse critério.

Dessa forma, quanto mais próxima à fonte se localiza o dispositivo a ser implantado, ou seja, quanto mais sistemas distribuídos em uma dada bacia de drenagem, melhor é o arranjo do projeto.

Critério 8: Custo

O presente critério é avaliado por meio de dois indicadores: o primeiro relacionado aos custos de construção e o segundo relacionado aos custos de manutenção e operação dos sistemas.

$$IC_{CUST1} = Ci + Ce$$ (Preferência decrescente, faixa de variação: $[0, +\infty[$) (14)

Ci: custos de investimentos (incluindo custo do terreno) (reais), Ce: custos dos estudos preliminares (reais), como o custo dos testes de permeabilidade, por exemplo

$$IC_{CUST2} = C_m$$ (Preferência decrescente, faixa de variação: $[0, +\infty[$) (15)

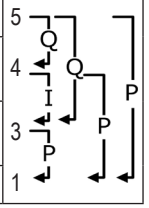
C_m: custo total de operação e manutenção ao longo da vida útil do sistema, ou ao longo de um período escolhido para a análise (reais)

Critério 9: Qualidade do projeto (multifuncionalidade)

Esse indicador é utilizado para descrever a capacidade do sistema em desempenhar outras funções, segundo a expectativa dos habitantes do entorno da área em estudo. A Tabela 6 mostra os possíveis valores do indicador de acordo com as características do sistema. Os valores foram obtidos por meio de um método, que obedece limites de indiferença e preferência, com base nos limites de indiferença, preferência fraca e preferência estrita propostos por Roy (1978). Para a obtenção das notas para cada uma das outras funções do sistema foi escolhido o valor inferior ou igual a 1 para indiferença (I), maior que 1 e inferior ou igual a 2 para preferência fraca (Q) e maior que 2 para preferência estrita (P). Os níveis de preferência definidos por alguns participantes do grupo de trabalho são mostrados na **Tabela 6**, onde I indica indiferença, Q indica preferência fraca e P indica preferência estrita. A partir desses níveis de preferência calcula-se os valores das notas, tendo-se adotado a menor nota como 1.

TABELA 6
Valores segundo as características dos sistemas

Outras funções do sistema	IC_{QUAL}
Atende às expectativas dos usuários	5
Não atende às expectativas dos usuários, mas tem características positivas	4
As outras funções não têm nenhuma importância	3
Não atende às expectativas dos usuários	1



AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS INDICADORES

A qualidade da metodologia de auxílio à decisão depende a qualidade individual de cada indicador, da qualidade do jogo de indicadores, e, finalmente, da qualidade do método multicritério escolhido para seleção, classificação ou ordenação das alternativas.

Para a avaliação da qualidade individual dos indicadores, encontram-se na literatura duas diferentes abordagens (Kastner, 2003). A primeira delas é baseada na verificação de uma série de qualidades gerais definidas *a priori* (Labouze & Labouze, 1995; Bellagio, 1996; Pastille, 2002). A segunda abordagem consiste em uma análise dos erros observados durante a aplicação dos indicadores (Perrin, 1998).

Considerando-se as ideias principais dos citados autores, a qualidade dos indicadores deve ser avaliada segundo os aspectos a seguir.

- Acessibilidade: disponibilidade de dados ou capacidade de obtenção de dados a um custo aceitável, e facilidade de cálculo do indicador;
- Objetividade: resultados com uma mesma tendência, ainda que o indicador seja avaliado por diferentes decisores;
- Ausência de ambiguidade: diferentes decisores avaliarem os indicadores da mesma maneira;
- Relevância do aspecto considerado;
- Robustez: estabilidade dos resultados frente a variações nos valores dos indicadores segundo as incertezas dos dados utilizados;
- Sensibilidade: capacidade dos indicadores em discriminar diferentes alternativas;
- Fidelidade: capacidade dos indicadores a serem calculados de forma unívoca ou com um viés constante.

Para que haja um jogo de indicadores de qualidade, o número de indicadores considerado na análise é importante. Na verdade, o jogo de indicadores deve ser exaustivo, mas seu número não deve ser excessivo, uma vez que um grande número de indicadores a considerar na análise pode trazer dificuldades na aplicação da metodologia. Além disso, a independência ou redundância há de ser avaliada.

Cada um dos indicadores propostos possui sua própria avaliação de qualidade, realizada por meio da aplicação dos indicadores a diversas alternativas de projetos, por diferentes decisores. Os indicadores propostos foram testados dessa forma e apresentaram resultados satisfatórios; alguns deles possuem incertezas elevadas, porém essas incertezas podem ser facilmente estimadas e consideradas compatíveis com os limites de indiferença e de preferência do método multicritério. Os testes realizados foram longos, sendo detalhadamente descritos em Moura (2008).

ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Um método multicritério é utilizado para agregar os indicadores já apresentados. Abordagens multicritério apresentam a vantagem da possibilidade de consideração de todos os aspectos considerados importantes na análise (Roy, 1996; Vincke, 1992), sendo que sua utilização tem crescido na ordenação de alternativas em drenagem urbana, como por exemplo, em Barraud et al. (1998), Ellis et al. (2004) e Castro & Baptista (2004). No caso presente, a abordagem multicritério foi escolhida basicamente por duas razões. A primeira delas é relacionada ao fato de que os aspectos a serem avaliados são bastante heterogêneos. Alguns critérios são avaliados por meio de modelagem numérica, outros são qualitativos. Alguns indicadores são bastante confiáveis, outros possuem grandes faixas de incerteza. A segunda razão é que uma abordagem multicritério não necessita de agregação *a priori*, não havendo consequentemente nenhum efeito de compensação entre indicadores, além da possibilidade que o decisor tem de controlar e acompanhar a evolução de aspectos críticos de uma alternativa de projeto.

Para o tipo de indicadores aqui propostos, métodos multicritério baseados em agregação parcial são os mais adequados, devido ao grande número de indicadores e a possibilidade de se levar em consideração as incertezas de cada um deles. O método ELECTRE III é um método desse tipo. Ele foi proposto por Roy (1978) e se baseia na consideração da natureza difusa

(imprecisa e incerta) dos indicadores, considerando explicitamente a indiferença, preferência e veto, através de limites. O ELECTRE III começa com um conjunto finito de aspectos (critérios) a serem considerados, avaliados por um conjunto de indicadores e subindicadores e agrega as preferências parciais das alternativas através de uma relação de ordenamento difusa. Para isso, as alternativas são comparadas em pares, através de cada um dos seus indicadores, que podem por essa razão terem sua escala própria. Os pesos dos indicadores refletem a importância relativa de cada um deles, e no método ELECTRE III são esses pesos que são agregados. A relação entre as duas alternativas comparadas é dada de acordo com dois tipos de índices. Esses índices medem a credibilidade da afirmação "*a alternativa i supera a alternativa k*". A credibilidade será tanto maior quanto maior o número de critérios da *alternativa i* que forem melhores que aqueles da *alternativa k* (índice de concordância) e, para os critérios cuja *alternativa i* é pior do que a *alternativa k*, as diferenças entre esses não são significantes (índices de discordância). Dois pré-ordenamentos são então obtidos através de um procedimento de destilação; o primeiro, descendente, classifica da melhor alternativa para a pior e, o segundo, ascendente, que classifica da pior alternativa para a melhor. A interseção entre essas pré-ordens dá origem à ordenação final.

ESTUDO DE CASO

Com a finalidade de avaliar e testar a metodologia proposta, esta foi aplicada a um estudo de caso. Ele se refere a uma área residencial localizada no sudeste da França, escolhida devido à variedade de alternativas de drenagem estudadas. Para todas as alternativas, a totalidade das áreas era drenada por técnicas de infiltração. Os cenários estudados são os seguintes:

- Cenário 1: denominado "Solução por poços e trincheiras": as vias de circulação de veículos automotores eram drenadas por trincheiras e as residências por poços de infiltração;
- Cenário 2 denominado "Solução por poços": a área é totalmente drenada por poços de infiltração;
- Cenário 3 denominado "Solução por bacia de infiltração": a totalidade da área sendo drenada por uma bacia de detenção/infiltração, localizada em um parque à jusante.

A avaliação dos indicadores é mostrada na Tabela 7, sendo que o valor da condutividade hidráulica saturada, utilizada no cálculo do IC_{PL3} não estava disponível, esse indicador então foi excluído da análise.

PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS

O peso de cada critério representa sua importância relativa, entre os diversos critérios atribuídos pelo decisor, para cada situação específica. Os pesos utilizados no presente estudo de caso são apresentados na Tabela 8, onde também são listados limites inerentes à metodologia, descritos ulteriormente.

Para os indicadores calculados por meio de expressões matemáticas os limites são expressos em porcentagem do valor calculado e para os indicadores qualitativos os limites são expressos em valores globais. Nota-se que para os subindicadores de proteção do lençol 3 e de pressão antrópica apresentam altos valores para os limites. Os valores dos limites foram obtidos por meio da propagação das incertezas, quanto ao subindicador IC_{PL3} devido à alta variabilidade espacial das medidas da condutividade hidráulica saturada e quanto ao subindicador IC_{PR}, devido aos grandes coeficientes de variação dos valores do fator Fi.

Conforme expresso anteriormente, o método Electre III pressupões três limites a serem associados a cada critério. O primeiro deles é o limite de indiferença por meio do qual o decisor demonstra de forma clara a indiferença no indicador. O segundo limite é o de preferência, valor acima do qual o decisor tem certeza de uma preferência estrita. Entre os dois limites, há a situação de preferência fraca, indicando que o decisor hesita entre a indiferença e a preferência estrita. E, finalmente, o limite de veto (que não é compulsório), que representa a diferença máxima aceitável entre duas alternativas a serem comparadas, para um dado critério. No presente estudo, para alguns indicadores as incertezas no cálculo do indicador foram utilizadas para o estabelecimento desse limite. Além disto, nenhum limite de veto foi identificado para os critérios utilizados no presente trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme o método adotado, Electre III, o resultado final da análise não se prende ao cálculo de um índice global, mas sim ao ordenamento das soluções. Assim, no estudo de caso específico, o resultado obtido é mostrado na Figura 2, onde se constata que dentre as alternativas estudadas, a solução por

TABELA 7

Pesos, limites de indiferença (LI), limites de preferência (LP) para cada um dos indicadores

Indicadores	Alternativa 1 (poços+ trincheiras)	Alternativa 2 (Bacia de infiltração)	Alternativa 3 (Poços)
IC_{HID1} (anos)	10	20	10
$IC_{HID2VIA}$ (m^3)(1)	49	0	30
$IC_{HID2EST}$ (m^3)(1)	0	0	0
$IC_{HID2RES}$ (m^3)(1)	1	0	20
$IC_{HID2PARC}$ (m^3)(1)	0	0	0
$IC_{HID2IAR}$ (m^3)(1)	0	0	0
$IC_{HID2IBR}$ (m^3)(1)	0	0	0
$IC_{HID2EQU}$ (m^3)(1)	0	0	0
IC_{PL1} (m)	1	1	1
IC_{PL3} (m/s)	1	1	1
IC_{PR} (Adim.)	10,64	110,06	11,16
IC_{REC} (Adim.)	1,00	1,00	1,00
IC_{RN} (Eq. Habitante $\times 10^5$)	171 096	213 360	468 552
IC_{MAN} (Adim.)	2	4	1
IC_S (Adim.)	1,00	10,80	1,00
IC_{RS} (m^2)(	348,67	13 662,80	116,44
IC_{COST1} (R$)	419 966,82	1 748 418,59	312 530,40
IC_{COST2}(2) (R$)	235 557,62	1 883 075,96	40 392,10
IC_{QUAL} (Adim.)	4	4	4

(1) Indicadores estimados com um período de retorno de 50 anos

(2) Indicador calculado segundo os custos da bibliografia (Moura, 2004)

TABELA 8

Pesos, limites de indiferença (LI), limites de preferência (LP) para cada um dos indicadores.

Indicadores	Pesos	LI	LP
IC_{HID1}	**4,6**	**0**	**2**
$IC_{HID2VIA}$	**0,2**	**20%**	**50%**
$IC_{HID2EST}$	**0,2**	**20%**	**50%**
$IC_{HID2RES}$	**0,7**	**20%**	**50%**
$IC_{HID2PARC}$	**0,2**	**20%**	**50%**
$IC_{HID2IAR}$	**1,4**	**20%**	**50%**
$IC_{HID2IBR}$	**0,7**	**20%**	**50%**
$IC_{HID2EQU}$	**1,4**	**20%**	**50%**
IC_{PL1}	**4,5**	**0,5**	**0,5**
IC_{PL2}	**4,5**	**0,58**	**1**
IC_{PL3}	**4,5**	**500%**	**1000%**
IC_{PR}	**4,5**	**467%**	**467%**
IC_{REC}	**4,5**	**4,95%**	**4,95%**
IC_{RN}	**4,5**	**0,001**	**10%**
IC_{MAN}	**7,9**	**1**	**2**
IC_S	**7,9**	**1,6**	**3,2**
IC_{RS}	**7,9**	**2,52%**	**5%**
IC_{CUST1}	**16**	**0,1**	**0,2**
IC_{CUST2}	**16**	**0,2**	**0,3**
IC_{QUAL}	**7,9**	**1**	**2**

poços ficou em primeiro lugar e a solução por bacia de infiltração em último. A mesma ordenação foi obtida nas pré-ordens ascendente e descendente, como descrito anteriormente.

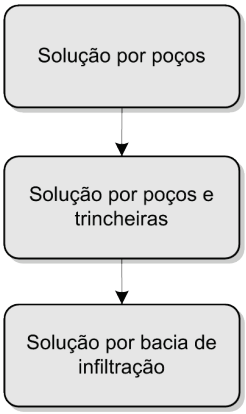


Figura 2. Resultados do ELECTRE III, ordenamento final

Análises de sensibilidade e robustez foram realizadas por meio de variações nos pesos dos indicadores e nos limites de indiferença e de preferência. A solução de base não sofreu alterações, porém, em certas simulações a solução por poços e trincheiras obteve o primeiro *ranking*, empatada com a solução por poços. Em todas as simulações a solução por bacia de infiltração foi classificada em última posição, indicando uma preferência por soluções de controle na fonte.

CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou uma metodologia para o auxílio à decisão na avaliação e comparação de alternativas de projetos de drenagem, utilizando sistemas de infiltração, na fase de concepção.

A metodologia proposta fundou-se em um conjunto de 20 indicadores construídos a partir de nove critérios, consolidados por um grupo de especialistas, de diferentes áreas de atuação. Para agregação dos resultados adota-se o método Electre III.

A metodologia assim estabelecida foi aplicada a um estudo de caso relativo a uma área residencial com três alternativas de projeto. O cálculo dos indicadores e sua posterior agregação permitiram a ordenação das alternativas que apontou a solução por poços como sendo a de melhor desempenho. A metodologia proposta foi validada por meio de análises de sensibilidade e robustez, que evidenciaram a estabilidade dos resultados obtidos.

Desta forma, acredita-se que a metodologia proposta apresenta potencial de utilização em outras situações, tendo em vista sua flexibilidade para diferentes condições locais e de alternativas de solução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Région Rhône Alpes, à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelo financiamento à presente pesquisa.

Referências

Barraud, S., Azzout, Y., Crès, F.N. (1998). Méthodologie d'aide à la décision pour la conception et la sélection de techniques alternatives en assainissement pluvial. Journal of Decision Systems; 7, 69 - 86.

Ballant, J-L. (2007). Le changement climatique : Inventaire des actions à mener pour lutter contre le réchauffement du climat. 8ème édition. 87p. <http://www.planete1sugg.net/doc/planete1sugg-ed08maj.pdf>, consulted in 28 Jan 2008.

Bellagio (1996). Bellagio Principles: Guidelines for the Practical Assessment of Progress Towards Sustainable Development. Winnipeg, Manitoba, Canada: International Institute for Sustainable Development, (disponível em http://iisd1.iisd.ca/measure/bellagio1.htm).

Castro, L. M. A.; Baptista, M. B. (2004). Indicators proposition for urban drainage systems evaluation in developing countries. Novatech 2004. Vol. 2., 1333 - 1340. Lyon, France.

CHEBBO G. (1992) Solides des rejets pluviaux urbains caractérisation et traitabilité. Thèse de Doctorat. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 413 p + anexos.

Dechesne M., Barraud S., Bardin J.P. (2004) Indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins. Journal of Environmental Management, 71(4), 371 - 380.

Ellis J.B., Deutsch J.-C., Mouchel J.-M., Scholes L., Revitt M.D (2004). Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. Science of the total Environment, 334-335,.251 – 260.

Jansen, R.; Koster, M.; Strijtveen, B. (1990). Milieuvriendelijk verpakken in de toekomst: een Cenário voor 2001. Amsterdam: Vereniging Milieudefensie, 121 p.

Kastner, A. (2003). Etude critique d'un jeu d'indicateurs pour l'évaluation des techniques alternatives d'infiltration des eaux pluviales. DEA Génie Civil - URGC – INSA de Lyon, France, 116 p.

Labouze, E., Labouze, R. (1995). La comptabilité de l'Environnement. Revue Française de Comptabilité, Paris : Éd. Expert Comptable Mensuel Média, 272, 1995, 92 p.

MINISTERIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional: ano base 2004. Relatorio Final. Rio de Janeiro: EPE, 2005, 188 p.

Moura, P. M. (2004), Avaliação global de sistemas de drenagem urbana. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 146 f.

Moura P. (2008) Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. PhD Thesis. INSA – Lyon, France.

Moura P.; Barraud, S., Baptista, M.B. (2009). O funcionamento dos sistemas de infiltração de águas pluviais urbanas. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande.

Promoting Action for Sustainability Through Indicators at the Local Level in Europe - PASTILLE (2002). Indicators into Action: a practitioners guide for improving their use at the local level. European Union FP5 report, 35 p.

Perrin, B. (1998), Effective Use and Misuse of Performance Measurement. American Journal of Program Evaluation, 19 (3), 367-379.

Roy B. (1996). Multicriteria methodology for decision aiding, Dordrecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers, 292 p.

Roy, B. (1978). ELECTRE III: Un algorithme de rangement fondé sur une représentation floue de préférences en présence de critères multiples. Cahiers du Centre d'Études de recherche opérationnelle, 20, 3-24.

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology, 15(3): 234-281.

Saget A. (1994). Base de données sur la qualité des rejets urbains de temps de pluie : distribution de la pollution rejetée, dimensions des ouvrages d'interception. Thèse de l'école nationale des ponts et chaussées, 227p.

Vincke P. (1992). Muticriteria decision-aid. Chichester (England): John Wiley & Sons, 154 p.

Priscilla Macedo Moura Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: priscilla.moura@ehr.ufmg.br

Sylvie Barraud Université de Lyon, INSA-Lyon. E-mail: sylvie.barraud@insa-lyon.fr

Márcio Benedito Baptista Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: marcio.baptista@ehr.ufmg.br